

0-772952

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи

Миланова Юлия Владимировна



ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

Специальность 01.03.02 -- астрофизика и радиастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2008

Работа выполнена на кафедре астрофизики математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Холтыгин Александр Федорович.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Вибе Дмитрий Зигфридович, Институт астрономии РАН,

доктор физико-математических наук Погодин Михаил Александрович, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН.

Ведущая организация:

Государственный Астрономический институт имени П.К.Штернберга МГУ.

Защита состоится 16 декабря 2008 г. в 15 часов 30 минут на заседании совета Д 212.232.15 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28, ауд. 2143 (математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ

Автореферат разослан

<11 ноября> 2008 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000438958

Ученый секретарь
диссертационного совета

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping, fluid strokes.

Орлов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Химическая эволюция Галактики регулируется звездообразованием, потерей звездами вещества, истечением газа из их атмосфер и зависит от химического состава вещества, вовлеченного в эти процессы. Образование планетарной туманности оказывает прямое влияние на химическую эволюцию Галактики, поскольку сопровождается потерей значительной доли массы звезды на конечных этапах ее жизни, когда завершаются процессы ядерного горения. При этом межзвездная среда обогащается тяжелыми элементами — продуктами ядерных реакций в звезде.

Важными наблюдательными тестами моделей химической эволюции Галактики является сравнение градиентов содержаний химических элементов в Галактике, определяемых для каких-либо галактических объектов с вычисленными в теоретических моделях химической эволюции Галактики. Весьма удобно использовать для получения таких тестов галактические ПТ, так как они видны на больших расстояниях и для них достаточно надежно определяются содержания элементов. Большой интервал возможных возрастов звезд-предшественников туманностей позволяет при определении градиентов химического состава в Галактике для ансамбля галактических ПТ проследить изменение химического состава межзвездной среды Галактики на протяжении значительной части ее эволюции.

Однако интерпретация наблюдательных данных и их теоретическое истолкование затрудняется тем, что остаются нерешенными такие проблемы, как получение надежной шкалы расстояний до галактических ПТ и пока еще существующие значительные ошибки определения содержаний химических элементов в них. Использование новых наблюдений в ультрафиолетовом (УФ) и инфракрасном (ИК) диапазонах, выполненных в последние годы со спутников HST, FUSE, ISO, Spitzer, дает возможность увеличить точность определения содержания этих элементов.

Таким образом, можно сделать вывод, что решение одной из важнейших проблем астрофизики — изучение химической эволюции Галактики — невозможно в полной мере без исследования свойств газовых туманностей. Тем самым **актуальность** темы диссертации, посвященной детальному изучению химической эволюции ансамбля планетарных туманностей нашей Галактики, представляется несомненной.

Современные наблюдения ПТ с использованием больших наземных телескопов и внеземных космических обсерваторий позволяют получать качественные спектры и определять химический состав ПТ и в ближайших к нам галактиках. Сравнение полученных содержаний с найденными для нашей Галактики может служить ключом к пониманию сходства и различий в химической эволюции нашей Галактики, галактик Местной группы и более далеких звездных систем, что также является одной из наиболее актуальных задач астрофизики.

Целью работы является исследование свойств и химической эволюции ансамбля галактических ПТ и туманностей Магеллановых облаков на основе анализа их физических свойств.

Для достижения цели диссертационной работы решаются следующие задачи:

- моделирование спектров туманностей и определение параметров моделей, в том числе содержаний элементов в туманностях;
- составление однородного каталога параметров ПТ и содержаний химических элементов в них с использованием как полученных в настоящей работе параметров, так и

литературных данных;

- исследование эволюции химического состава ПТ путем сравнения с синтетическими моделями эволюции звезд малых и промежуточных масс. Анализ зависимости содержаний элементов от масс центральных звезд галактических ПТ и построение функции масс ядер туманностей;
- определение градиентов содержания химических элементов в Галактике как из анализа всего ансамбля галактических ПТ, так и для выборок туманностей с различными возрастами их звезд-предшественников;
- исследование эволюции содержания элементов в различных областях Галактики в сравнении с современными моделями химической эволюции Галактики. Сравнение химического состава туманностей нашей Галактики и ПТ Магеллановых облаков;
- изучение ПТ с экстремально низкими содержаниями С, N, O и более тяжелых элементов.

Научная новизна работы.

В диссертации впервые оценены ошибки определения параметров туманностей и содержаний в них химических элементов, связанные с неточностями наблюдаемых интенсивностей линий. Построены функции распределения ошибок параметров туманностей. Исследована функция распределения ошибок параметра среднеквадратичных температурных флуктуаций t^2 при его определении из анализа спектра туманности NGC 7027. Показано возможное присутствие двух компонентов функции распределения, первый из которых соответствует вкладу крупномасштабных, второй — мелкомасштабных вариаций температуры в туманности.

Исследована зависимость содержаний элементов от масс центральных звезд галактических ПТ и показана статистическая значимость корреляций содержаний и масс звезд-предшественников ПТ. Получено соотношение, связывающее содержание элементов в туманностях с массами их центральных звезд, которое использовано для построения функции масс ядер планетарных туманностей.

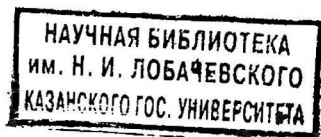
Из анализа содержаний элементов различных подсистем Галактики сделан вывод о сходстве объектов балджа Галактики с туманностями типа II в классификации Пеймберта, а туманностей Магеллановых облаков — с объектами гало Галактики.

Теоретическая и практическая ценность.

Рассчитанные автором диссертации содержания He, C, N и O для более чем 120 ПТ на основе модернизированной стохастической модели туманностей, учитывающей существование флуктуаций температуры и плотности газа туманностей, могут быть использованы для проверки теорий эволюции звезд малых и промежуточных масс, а также изучения химической эволюции Галактики.

Проведенные расчеты содержаний He, C, N и O, а также данные, полученные из литературы, в том числе галактоцентрические расстояния и содержания He, C, N, O, Ne, Cl, Ar и S, вошли в каталог параметров туманностей, который может быть использован в различных астрофизических исследованиях.

Градиенты содержаний химических элементов галактических ПТ, определенные в данной работе, могут служить при тестировании моделей химической эволюции Галактики.



Полученное автором диссертации соотношение, связывающее содержание элементов в туманностях с массами их центральных звезд, может быть использовано для построения функции масс ядер планетарных туманностей.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах Астрономического института СПбГУ, а также на следующих международных и всероссийских конференциях и симпозиумах:

1. I-ая Всероссийская астрономическая конференция, Санкт-Петербург, 6-12 августа 2001 г.
2. II-ая Всероссийская астрономическая конференция, Москва, 3-8 июня 2004 г.
3. Международная конференция «Астрономия-2005. Проблемы и Перспективы», Москва, 1-6 июня 2005 г.
4. Генеральная ассамблея МАС XXVI, Прага, 14-25 августа 2006 г.
5. III-я Всероссийская астрономическая конференция, Казань, 17-22 сентября 2007 г.
6. Всероссийская конференция «Ультрафиолетовая Вселенная», Москва, 19-20 мая 2008 г.
7. Международная научная конференция «Астрономия и астрофизика начала XXI века», Москва, 1-5 июля 2008 г.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ю.В.Лунёва, А.Ф.Холтыгин, *Химическая эволюция системы планетарных туманностей Галактики*, в сб. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2001, Санкт-Петербург, Тезисы докладов, с. 115 (2001)
2. Ю.В.Лунёва, А.Ф.Холтыгин, *Химическая эволюция системы галактических планетарных туманностей*, Астрофизика, **45**, с. 451-463 (2002)
3. Ю.В.Миланова, А.Ф.Холтыгин, *Зависимость содержания элементов в планетарных туманностях от массы их центральных звезд*, в сб. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2004, Москва, Тезисы докладов, с. 118 (2004)
4. Ю.В.Миланова, А.Ф.Холтыгин, *Эволюция содержаний элементов в планетарных туманностях*, Письма в Астрон.ж, **32**, N8, с. 618-628 (2006)
5. Yu.V.Milanova, A.F.Kholtygin, *AGB Stars: Testing Carbon Loss Via The Ultraviolet Lines*, The Ultraviolet Universe: Stars from Birth to Death, JD04 of 26th meeting of the IAU, Prague, #1 (2006)
6. A.F.Kholtygin, Yu.V.Milanova, *Planetary Nebulae: A Probe Of The Galaxies Evolution Up To The Hubble Time*, Galaxy Evolution Across the Hubble Time, IAU Symposium 235, Prague, #225 (2006)

7. Ю.В.Миланова, А.Ф.Холтыгин, *Химическая эволюция ансамбля галактических планетарных туманностей*, Труды Всероссийской Астрономической конференции ВАК-2007, Казань, с. 364 (2007)
8. А.Ф.Холтыгин, Ю.В.Миланова, *Ансамбль планетарных туманностей Галактики и Магеллановых облаков*, Международная научная конференция «Астрономия и астрофизика начала XXI века», Москва, Тезисы докладов, с. 101 (2008)

Все работы написаны в соавторстве. В работах (1) и (2) диссертанту принадлежат расчеты градиентов содержания элементов и обсуждение результатов. В статьях (3) и (4) диссертанту частично принадлежит постановка задачи и выполнение всех расчетов, соотношение, связывающее содержания рассматриваемых элементов в планетарных туманностях с массами их центральных звезд, построение функции масс ядер туманностей. В работе (5) выполнен расчет и сравнение модельных содержаний углерода с полученными из наблюдений для выборки галактических планетарных туманностей в зависимости от массы звезды-предшественника туманности. В публикациях (6) и (7) диссертанту принадлежит составление и дальнейшая поддержка каталога параметров туманностей, расчеты градиентов содержания элементов, обсуждение и интерпретация результатов. В статье (8) — моделирование ошибок определения параметров ПТ, создание и усовершенствование Интернет-каталога параметров ПТ, а также частично — интерпретация результатов расчетов.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из пяти глав, списка цитируемой литературы (163 названия), 4 приложений, списка иллюстраций (34 названия) и списка таблиц (21 название). Общий объем диссертации — 129 страниц.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Создание однородного интернет-каталога параметров планетарных туманностей Галактики и Магеллановых облаков.
2. Заключение о согласии зависимости содержания элементов в планетарных туманностях от массы ядра центральной звезды туманности с определяемыми по теории эволюции звезд малых и промежуточных масс ($1 - 8M_{\odot}$).
3. Вывод о расхождении градиентов содержания элементов в Галактике, определяемых из исследования ансамбля галактических планетарных туманностей, с рассчитываемыми в современных моделях химической эволюции Галактики.
4. Утверждение о статистической значимости зависимости градиентов содержания элементов в ПТ от возраста звезды-предшественника.
5. Вывод о сходстве объектов балджа Галактики с туманностями типа II в классификации Пеймберта, а туманностей Магеллановых облаков — с объектами гало Галактики.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении (первая глава диссертации) дано краткое описание исследуемых объектов, отражены актуальность проблемы, цель исследования и постановка задачи. Представлены основные результаты диссертации и положения, выносимые на защиту. Показаны их научная новизна и практическая ценность. Описывается структура диссертации.

Даны основные сведения о системе галактических планетарных туманностей (ПТ). Дана характеристика ПТ: описана их эволюция; рассмотрены физические параметры ПТ и методы их определения. Приведены основные сведения о химическом составе и спектрах туманностей в нашей и других галактиках. Приведены результаты сравнения содержания элементов в туманностях и областях НII, принадлежащих различным галактикам.

В главе 2 **Моделирование спектров и диагностика плазмы планетарных туманностей** описаны используемая в диссертации методика расчета интенсивностей линий в спектрах туманностей и методы определения характеристик плазмы газовых туманностей.

В параграфе 2.1 описаны основные механизмы образования линий в газовых туманностях. В пункте 2.1.1 изложена методика расчета интенсивностей рекомбинационных линий и введено понятие парциальной меры эмиссии плазмы. Пункт 2.1.2 посвящен изложению методов определения интенсивностей линий, возбуждаемых столкновениями с электронами. Используемые в диссертации эффективные коэффициенты рекомбинации и столкновительного возбуждения представлены в пункте 2.1.3.

В параграфе 2.2 даны соотношения для определения характеристик плазмы с флуктуациями температуры и электронной концентрации в *линейном приближении*. В этом приближении предполагается, что амплитуда флуктуаций мала по сравнению со средними значениями соответствующих величин. Исследовано влияние флуктуаций температуры и плотности на интенсивности линий в спектрах ПТ.

Описание используемой в диссертации модели и процедура определения параметров туманностей изложены в параграфе 2.3. Введено понятие класса возбуждения туманностей и описана процедура учета ионизационных поправок за ненаблюдаемые стадии ионизации элементов.

В пункте 2.3.1 сформулирована проблема диагностики плазмы в целом и описана *стохастическая* модель туманности.

В параграфе 2.4 изложен вероятностный метод решения задач диагностики, основанный на принципе *максимального правдоподобия*. Показана важность учета реальной статистической функции распределения ошибок измерения используемых при диагностике величин (интенсивностей линий) для надежного определения параметров плазмы. Представлены результаты приложения предложенной методики диагностики плазмы к определению параметров ярких ПТ. Изложен метод определения оптимальных параметров туманности из сравнения рассчитанных в модели и наблюдаемых в спектре туманности интенсивностей линий на основе использования принципа максимального правдоподобия [1].

Показано, что рассмотренный в диссертации статистический подход к решению задач диагностики позволяет определять не только средние значения $\overline{T_e}$ и $\overline{n_e}$ электронной температуры и концентрации плазмы туманностей, но и амплитуды флуктуаций этих величин.

Параграф 2.5 посвящен изложению методики моделирования ошибок определения параметров ПТ. Для моделирования была выбрана туманность NGC 7027, наблюдаемые интенсивности линий в спектре которой известны с высокой точностью, поэтому их можно в первом приближении считать равными их математическим ожиданиям. Исходя из резуль-

тата проведенного нами анализа можно сделать вывод, что содержание гелия определяется с точностью около 10–15%, тогда как ошибки определенных содержаний C, N и O составляют 0.1–0.2 dex. Учет неточностей ионизационных поправок за стадии ионизации элементов, линии которых отсутствуют в спектрах туманностей, увеличивает ошибки в определении содержания He до 0.1 dex, а содержаний C, N и O – до 0.3 dex.

В третьей главе **Химический состав галактических и внегалактических ПТ** моделируются спектры ПТ. Из результата сравнения наблюдаемых и теоретических спектров ПТ определяются параметры туманностей и содержание He, C, N и O в них.

В параграфе 3.1 описано применение изложенной в параграфе 2.3 стохастической модели туманности для определения электронной температуры, концентрации и амплитуды флуктуаций температуры туманностей. Представлены результаты нахождения средней электронной температуры туманностей и амплитуды ее флуктуаций. Показана реальность существования мелкомасштабных флуктуаций температуры в туманностях. Результаты определения химического состава туманностей даны в параграфе 3.2. В пункте 3.2.1 изложены результаты определения содержания гелия.

В пункте 3.2.2 исследована так называемая *проблема углерода*, заключающаяся в том, что при определении содержаний углерода по интенсивностям рекомбинационных линий получаются величины, иногда на порядок и более превосходящие содержания, определяемые при использовании интенсивностей линий, возбуждаемых электронным ударом. Показано, что основными причинами такого расхождения содержаний являются флуктуации T_e в туманностях и переоценка наблюдаемых интенсивностей слабых рекомбинационных линий.

Результаты сравнения полученных содержаний с результатами других авторов представлены в пункте 3.2.3.

Параграф 3.3 посвящен описанию Интернет-сайта *Химическая и динамическая эволюция Галактики*. Выполненные в диссертации массовые определения параметров галактических и внегалактических ПТ использованы для обновления созданного ранее при участии автора диссертации *интернет-каталога параметров планетарных туманностей* [2].

В обновленный каталог добавлены полученные диссертантом содержания He, C, N и O и другие параметры для более, чем ста двадцати туманностей Галактики и Магеллановых облаков. Для туманностей, спектры которых, полученные в последние 5–7 лет, отсутствуют в литературе, использовались расчеты других авторов, представленные в работах, опубликованных не ранее 1994 года. Из этих же работ взяты содержания Ne, S, Cl и Ar, представленные в новом каталоге.

Четвертая глава **Эволюция содержаний элементов в ансамбле планетарных туманностей** посвящена анализу изменений содержаний элементов в туманностях в ходе эволюции Галактики.

Система галактических ПТ описана в параграфе 4.1. Из анализа составленного нами списка [2] получены средние расстояния от галактической плоскости, средние значения масс центральных звезд, а также стандартные отклонения этих величин в зависимости от их класса, согласно классификации, представленной в работе [3]. Из анализа полученных данных видно, что с удалением от плоскости Галактики массы ядер туманностей уменьшаются, что соответствует переходу от молодых звезд-предшественников туманностей к более старым объектам.

В параграфе 4.2 описана зависимость содержаний элементов в туманностях от массы их центральных звезд. Сделан вывод, что содержания элементов в планетарных туманностях зависят, в основном, от массы центральной звезды туманности. Эта зависимость аппроксимирована кусочно-линейной непрерывной функцией. Приведены параметры аппроксимации

для всех изучаемых элементов.

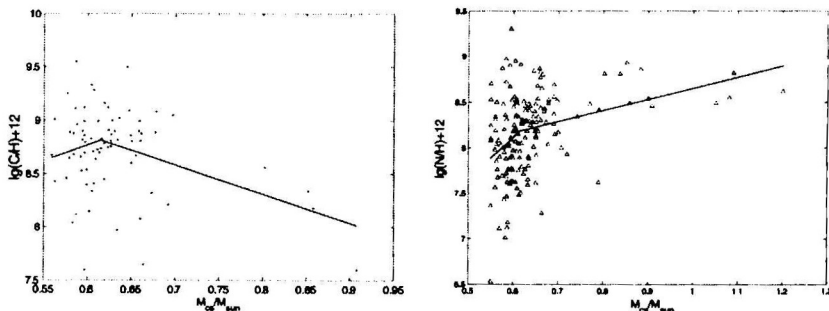


Рис. 1: Аппроксимация зависимости содержаний углерода от массы центральной звезды — сплошная линия. Точки и треугольники — содержания C и N для индивидуальных туманностей.

Для иллюстрации на Рис. 1 представлена полученная нами кусочно-линейная аппроксимация зависимости содержаний углерода и азота от массы центральной звезды туманности.

В параграфе 4.3 представлены результаты сравнения рассчитанных содержаний с полученными в синтетических эволюционных моделях. Синтетические модели эволюции ансамбля звезд малых и промежуточных масс в Галактике описаны в пункте 4.3.1.

В пункте 4.3.2 анализируется, как зависят содержания C, N и O в системе галактических ПТ от масс их звезд-предшественников.

Основываясь на синтетической модели эволюции ПТ [4], определены *предсказанные* содержания элементов в туманностях в предположении, что вещество звезды-предшественника, выброшенное на разных стадиях ее эволюции, полностью перемешано в туманности. *Предсказанные* содержания сравниваются с полученными автором диссертации средними содержаниями C, N и O для выборки галактических ПТ с известными начальными массами центральных звезд.

Теоретические зависимости содержаний C и N от M_{cs} в первом приближении соответствуют эмпирическим зависимостям, полученным в диссертации. Найденные нами средние содержания O оказались примерно в два раза меньше значений, полученных в модели. С увеличением масс звезд-предшественников от 1 до 6-8 M_{\odot} определенные нами для ансамбля галактических ПТ средние содержания C и N возрастают в 3-4 раза, в то время как содержание O почти не изменяется.

Зависимости содержаний Ne и Cl в ансамбле галактических ПТ от начальных масс звезд-предшественников анализируются в пункте 4.3.3. Сделан вывод, что содержание Ne и Cl в планетарной туманности определяется составом межзвездной среды в месте формирования звезды-предшественника в момент ее образования.

В пункте 4.3.4 сравниваются относительные содержания C, N и O в ансамбле ПТ с рассчитанными в синтетических моделях эволюции звезд малых и промежуточных масс [5].

Некоторые результаты сравнения иллюстрируются на рисунке 2, на котором дана зависимость отношений содержаний $\lg(C/O)$ от относительного содержания $\lg(O/H) + 12$. Видно уменьшение содержания углерода по отношению к содержанию кислорода в галактических ПТ при переходе от ПТ - потомков звезд с начальной металличностью $Z = 0.004$

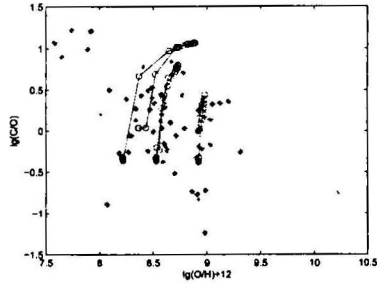


Рис. 2: Зависимость отношения содержания $\lg(C/O)$ от относительного содержания $\lg(O/H) + 12$ для галактических ПТ. Звездочки — положения на диаграмме ПТ, содержания С и О для которых получены в настоящей работе. Левая кривая (с двумя ветвями) — предсказанные в модели Мариго [5] положения ПТ с различными массами звезд-предшественников для начальной металличности $Z = 0.004$, средняя — для $Z = 0.009$, правая — для $Z = 0.019$.

к потомкам звезд с солнечной металличностью $Z = 0.019$.

В параграфе 4.4 построена гистограмма функции распределения масс центральных звезд туманностей. С целью увеличения статистической значимости отсчетов гистограммы у туманностей с неизвестными массами центральных звезд для их оценки использовалось соотношение полученное в диссертации соотношение между массами центральных звезд и содержанием элементов.

В главе 5 исследуется химическая эволюции системы галактических планетарных туманностей и туманностей Магеллановых облаков.

Ансамбль ПТ Галактики и Магеллановых облаков описан в параграфе 5.1.

В параграфе 5.2 представлены результаты определения радиальных и вертикальных градиентов содержания С, N, O, Ne, Ar, Cl и S для различных возрастов звезд-предшественников туманностей. Выявлена статистически значимая зависимость градиентов от возраста.

Обнаружено увеличение содержания углерода и азота (для углерода — до порядка величины) на больших галактоцентрических расстояниях (> 10 кпк) по сравнению с рассчитанными по модели химической эволюции [6].

Для всех тяжелых элементов, кроме кислорода, найдено заметное уменьшение содержания с увеличением расстояния туманностей от галактической плоскости. Статистически значимый вертикальный градиент содержания рассматриваемых нами элементов (кроме Cl) обнаружен только для туманностей промежуточных масс центральных звезд ($0.60 - 0.64 M_{\odot}$). Для Cl вертикальный градиент получен и для массивных центральных звезд ($> 0.64 M_{\odot}$).

В параграфе 5.3 анализируется эволюция химического состава Галактики по свойствам ансамбля галактических ПТ. Модели химической эволюции Галактики описаны в пункте 5.3.1. В пункте 5.3.2 изучена эволюция содержания элементов с изменением галактоцентрического расстояния и высоты над плоскостью Галактики.

Для иллюстрации сравнение полученных нами радиальных градиентов содержаний элементов С, N, O, Ne, Ar, Cl и Ar с предсказаниями моделей, представленных в работе [6], дано на Рис. 3. Из рисунка видно сильное расхождение между теоретическими и полученными

из наблюдений градиентами содержания С и N. В то же время получена статистически значимая зависимость градиентов химического содержания для ранних возрастов Галактики.

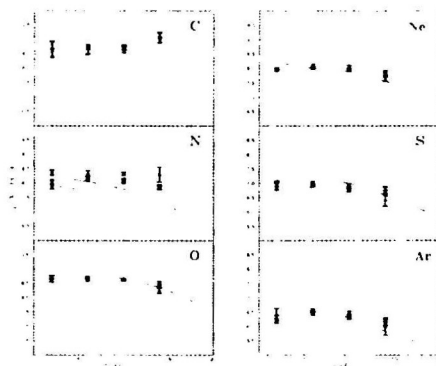


Рис. 3: Содержания элементов в функции галактоцентрического расстояния ПТ для различных возрастов звезд-предшественников туманностей. Пунктиром нанесены теоретические зависимости, рассчитанные в модели [6], пунктиром -- для Галактики возраста $1 \cdot 10^9$, сплошной линией -- $5 \cdot 10^9$ лет. Треугольники — полученные нами значения для галактоцентрических расстояний 2, 6, 10 и 14 кпк и интервала масс центральных звезд $[0.63-1.2] M_{\odot}$, звездочки — значения градиентов для тех же галактоцентрических расстояний и интервала масс центральных звезд $[0.57-0.63] M_{\odot}$.

В пункте 5.3.3 сравниваются полученные нами средние содержания кислорода для туманностей типов I+II+III и II+III по классификации [3] для различных интервалов расстояний туманностей от галактической плоскости в трех промежутках галактоцентрических расстояний: $R_z=5$ кпк, $R_z=8$ кпк, $R_z=11$ кпк с рассчитанными в рамках модели химической эволюции Галактики с учетом динамических эффектов [7].

Туманности с экстремально низкими содержаниями элементов анализируются в пункте 5.3.4.

В Приложении А приведены полученные в диссертации параметры галактических ПТ. Методика расчета коэффициента корреляции и его количественного критерия значимости описана в Приложении В. Рассчитанные интенсивности рекомбинационных линий гелия и рекомбинационной линии CII $\lambda 4267$ в галактических ПТ даны в Приложениях С и D, соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брандт З., Статистические методы анализа наблюдений, М.: изд. «Мир», с. 312 (1975)
2. http://www.astro.spbu.ru/staff/afk/GalChemEvol/Neb_Ab.html
3. Quireza C., Rocha-Pinto H.J., Maciel W.J., Astron. Astrophys., **475**, 217 (2007)
4. van den Hoek L.B., Groenewegen M.A.T., Astron. Astrophys., **322**, 123 (1997)
5. Marigo P., Astron. Astrophys., **370**, 194 (2001)
6. Alibés A., Labay J., Canal R., Astron. Astrophys., **370**, 1103 (2001)
7. Allen C., Carigi L., Peimbert M., Astrophys. J., **494**, 247 (1998)

702

Подписано к печати 07.11.08. Формат 60 × 84 $\frac{1}{16}$.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать цифровая. Печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ 4320

Отпечатано в Отделе оперативной полиграфии химического факультета СПбГУ
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 26
Тел.: (812) 428-4043, 428-6919